



Revista

Iberoamericana de

Automática

e Informática Industrial



ISSN: 1697-7912. Vol. 6, Núm. 3, Julio 2009, pp. 101-109

www.revista-riai.org

Un modelo para el análisis de la confiabilidad de Ethernet Industrial en topología de anillo

Guillermo R. Friedrich*, Jorge R. Ardenghi**

* *Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, 11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina. (e-mail: gfried@frbb.utn.edu.ar)*

** *Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación, Universidad Nacional del Sur, Avenida Alem 1253, 8000, Bahía Blanca, Argentina.*

Laboratorio de Investigación en Sistemas Distribuidos (LiSiDi), miembro del IICyTI (Instituto de Investigación en Ciencia y Tecnología Informática). (e-mail: jra@cs.uns.edu.ar)

Resumen: Ethernet Industrial es cada vez más utilizada para aplicaciones de automatización, tanto en industrias de manufactura como de procesos. Además de los requerimientos de ancho de banda y manejo de tráfico en tiempo real, estos entornos también presentan requerimientos muy fuertes en cuanto a la confiabilidad, debido a los riesgos inherentes a tales actividades. La topología de anillo es de aplicación habitual en este tipo de redes, debido a que, por tener un enlace redundante, provee una cierta capacidad de tolerancia a fallas. En el presente trabajo se analiza la confiabilidad de Ethernet Industrial en topología de anillo, con el objetivo de obtener resultados que favorezcan al diseño y selección de componentes, como así también que permitan estimar los requerimientos de mantenimiento correctivo. El modelo planteado considera en primera instancia solamente a los enlaces, a fin de analizar la confiabilidad de la comunicación entre conmutadores. Posteriormente se incluyen los conmutadores y se analiza la confiabilidad de la comunicación entre dispositivos de campo a través de la red. El tiempo de respuesta para la solución de una falla es uno de los componentes básicos del modelo considerado. Copyright © 2009 CEA.

Palabras Clave: confiabilidad de la red, topologías de red, análisis de confiabilidad, tiempo medio entre fallas (MTBF), tolerancia a fallas.

1. INTRODUCCIÓN

Luego de haberse impuesto en el mercado de las redes locales para oficinas, Ethernet ha ido ganando terreno en el campo de las aplicaciones industriales, a pesar de que en sus comienzos no había sido pensada para tal fin. La evolución tecnológica de Ethernet ha dado lugar a mayores velocidades de transmisión: 100 Mbps, 1 Gbps y más. El comportamiento probabilístico del protocolo CSMA/CD ha sido dejado de lado en las redes totalmente conmutadas con conexiones full-duplex (Jasperneite, 2002). Asimismo se ha desarrollado un mecanismo de prioridades, IEEE 802.1p, a fin de mejorar su desempeño en aplicaciones con restricciones de tiempo como la multimedia. Se ha evaluado su desempeño para tiempo real y se han propuesto mejoras (Lingyan, 2008). Incluso existen propuestas para introducir algunas variantes al protocolo 802.1p que posibiliten el manejo de las colas aplicando EDF (Zhan, 2005).

En el ámbito industrial las exigencias de robustez y confiabilidad se ven acrecentadas, debido a los riesgos inherentes a los sistemas y procesos bajo control. Una falla puede tener consecuencias en pérdida de vidas humanas, pérdidas económicas y/o daños medioambientales. La implantación de Ethernet en la automatización de plantas de procesos químicos y petroquímicos también implica cumplir con rigurosas normas de seguridad y protección (Fritsch, 2007). Si bien tales cuestiones caen fuera del alcance del presente trabajo, merecen ser mencionadas por la importancia que tienen en la práctica.

La robustez de un sistema implica que éste continúe operativo a pesar de la falla de algunos componentes. La confiabilidad de un

sistema es la probabilidad de que éste no falle, y depende de la confiabilidad de sus componentes y la interrelación entre ellos.

Una estrategia habitual para aumentar la robustez y la confiabilidad es la redundancia. En el caso de las redes, es usual disponer de enlaces redundantes, debido a que en general son los elementos más expuestos a sufrir perturbaciones y daños. Si bien Ethernet no es una red de anillo, es habitual que se utilice esta topología dado que permite tolerar la falla de un enlace. Si se la compara con redes concebidas para funcionar específicamente en anillo, como Token Ring o FDDI, se puede observar que en éstas los vínculos son unidireccionales y las tramas deben circular por todo el anillo hasta retornar al nodo de origen, donde son retiradas de la red. Por tal motivo, la manera de obtener redundancia de los vínculos es mediante un segundo anillo (Ocheltree, 1990).

En otros trabajos se ha analizado el desempeño de Ethernet en aplicaciones típicas de automatización, para la conexión de dispositivos de campo con el nodo de control, usando topologías de línea, árbol y anillo (Rüpping et al, 1999; Vonname et al, 2000; Jasperneite, 2001). El objetivo de estos trabajos era el análisis de la latencia para distintas condiciones de funcionamiento y diferentes topologías, teniendo en cuenta los requerimientos típicos de tiempo real de estos sistemas. Los resultados obtenidos mostraban que la topología de árbol es la que presenta menor latencia, debido a que los paquetes deben atravesar una menor cantidad de conmutadores. Sin embargo, los citados trabajos destacan que la topología de anillo tiene a su favor la redundancia, que es una propiedad importante para muchas aplicaciones críticas. En una línea similar está el trabajo

de (Lee, 2004) que calcula el máximo retardo de comunicación en una red Ethernet Industrial con múltiples conmutadores. Los resultados de dicho análisis se pueden extender a una topología de anillo, teniendo en cuenta que en la peor condición una trama deberá atravesar todos los conmutadores.

Teniendo en cuenta el beneficio de la topología de anillo, también existen propuestas para implementarla sin utilizar conmutadores, incorporando las funciones de conmutación en un módulo Ethernet de doble puerto y empleando un protocolo específico para el manejo de la reconfiguración de la topología (Yoon, 2006).

En el presente trabajo se analiza la topología de anillo desde el punto de vista de la confiabilidad y robustez que le aporta a una red Ethernet. Posteriormente se analiza su impacto sobre la operación y mantenimiento de la red y se indican algunas pautas de utilidad para el diseño, selección de equipamiento y estimación del esfuerzo y costos del mantenimiento correctivo. El trabajo se ha orientado a contribuir con elementos de utilidad para el ingeniero encargado del diseño de una red industrial.

Si bien se presenta una breve reseña de técnicas para el manejo de la redundancia, el trabajo está enfocado a estudiar el impacto que tienen los elementos de la capa física y los dispositivos que forman el anillo sobre la confiabilidad de la red.

1.1 El manejo de la redundancia y la topología de anillo

El mecanismo que inicialmente fue introducido para el manejo de la redundancia en redes Ethernet es Spanning Tree, especificado por el estándar IEEE 802.1D (IEEE, 2004). Puede presentar una latencia de entre decenas de segundos hasta minutos para reconfigurar la topología activa. Posteriormente fue desarrollado Rapid Spanning Tree, especificado por el estándar IEEE 802.1w, que presenta una latencia de hasta 3 s (Wojdak, 2003). Como tales demoras pueden ser excesivas para muchos sistemas de control, los principales fabricantes de equipamiento para Ethernet Industrial han desarrollado sus propios protocolos de redundancia, la mayoría basados en una topología de anillo (Prytz, 2006). Estos protocolos presentan una latencia inferior a 500 ms. Típicamente dependen de la circulación de una trama testigo emitida periódicamente por el conmutador maestro a través de uno de sus puertos. Si dicha trama es recibida por el maestro en el puerto opuesto significa que el anillo está en condiciones normales, mientras que la no recepción indica que existe alguna interrupción en el mismo.

En un anillo Ethernet en condiciones normales uno de los enlaces permanece bloqueado. Éste es activado luego de detectarse la caída de otro que estaba activo, según se muestra en la Figura 1.

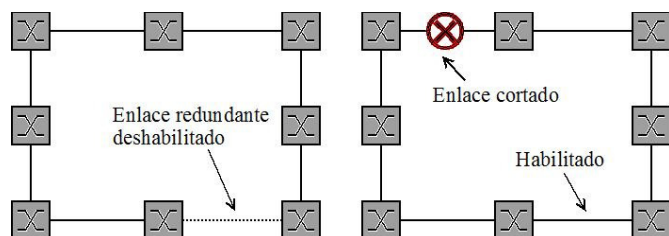


Figura 1. Anillo Ethernet: en condiciones normales con un enlace deshabilitado (izquierda) y con el enlace redundante habilitado luego de la falla de otro (derecha).

Cada vez que se realiza una reconfiguración en la topología, el maestro envía una notificación a todos los conmutadores, a fin de que borren sus tablas de conmutación y comiencen nuevamente con el aprendizaje de direcciones.

Cabe señalar que Spanning Tree y Rapid Spanning Tree también permiten el manejo de la redundancia sobre una topología de anillo.

Dado que las soluciones propietarias no son compatibles ni interoperables, el IEC ha estado trabajando durante los últimos años en la elaboración de un estándar apto para los requerimientos industriales. Se trata del proyecto IEC 62439 “High Availability Automation Networks”, pronto a ser publicado.

Por otra parte, Ethernet en anillo no sólo es de interés en el ámbito de las redes industriales sino también en las de transporte de datos (1/10/40 y 100 Gbps) en reemplazo de SDH/SONET. Para este tipo de redes la recomendación G.8032 de la ITU-T especifica un mecanismo para el manejo de la redundancia denominado Ethernet Ring Protection, con una demora inferior a los 50 ms para recuperarse de la interrupción de un enlace (Ryoo, 2008).

1.2 Aplicaciones típicas en la industria

Debido a la forma en que típicamente se encuentran distribuidos los distintos puntos a ser conectados mediante una red, ya sea en una planta industrial, una planta de procesos, un oleoducto o gasoducto, la topología de anillo presenta características favorables (Zhao, 2006). Si se diseña adecuadamente el tendido de los enlaces y se evita disponer en un mismo ducto o bandeja los cables o fibras correspondientes a dos enlaces, en caso de producirse algún evento (por ej.: rotura, incendio, etc.) que ocasione la falla de sólo uno de ellos, no se tendrá como consecuencia la pérdida de conectividad a través de la red.

Otra aplicación para un anillo de Ethernet Industrial es en la red que conecta los dispositivos de supervisión y control de oleoductos y gasoductos. En estos casos, una forma típica para implementar el anillo es la que se describe en la Figura 2, uniéndose en forma alternada los conmutadores existentes a lo largo del recorrido. En este caso, una precaución que se debería tomar es que las dos fibras que van tendidas entre cada par de conmutadores lo hagan por distintos ductos, con una cierta distancia entre ellos. Esto tiene la finalidad de reducir el riesgo de que se interrumpan dos enlaces a la vez (suele suceder que al efectuar una excavación, por error o negligencia se corten los cables allí existentes).

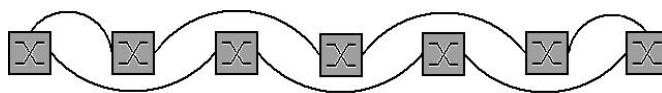


Figura 2. Despliegue de la topología de anillo a lo largo del tendido de un oleoducto o gasoducto.

1.3 Condiciones típicas de operación y mantenimiento.

Los sistemas de supervisión y control industrial que tienen condiciones de operación 24/7 le imponen similares requerimientos a la red sobre la que basan su funcionamiento. En casos como el control de una planta de procesos (por ej.: industria química o petroquímica) no es aceptable que se interrumpa la comunicación entre los dispositivos de campo y

que el sistema de control se encuentre obligado a detener el proceso. Sin embargo, como los elementos pueden fallar o averiarse es necesario adoptar ciertas medidas preventivas y correctivas.

En un anillo Ethernet la falla de un enlace no produce una pérdida de conectividad en la red, porque el enlace redundante lo reemplaza. El enlace averiado debe ser reparado con la menor demora posible, porque en el caso de interrumpirse algún otro vínculo durante ese lapso de tiempo, la red quedará fragmentada. Esto dará lugar a la pérdida de conectividad entre ambas secciones de la red, según se ve en la Figura 3.

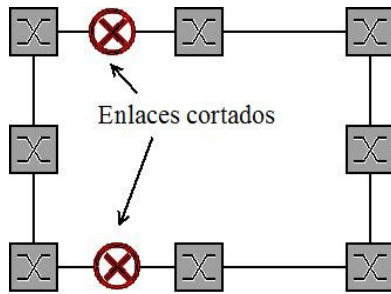


Figura 3. La red dividida en dos secciones disjuntas, debido a la falla simultánea de dos enlaces.

A los fines del análisis se ha considerado que un enlace averiado será reparado en un plazo máximo de 24 horas, lo que es un criterio de aplicación habitual para este tipo de redes. Por lo tanto, la probabilidad de falla del anillo depende de la probabilidad de que dos o más enlaces fallen en un mismo día. Por otra parte, en función de la cantidad de enlaces y la probabilidad de falla de cada uno, es posible estimar la frecuencia con que deberán realizarse trabajos de mantenimiento correctivo. Esto permite hacer una previsión de los recursos humanos, repuestos y otros costos relacionados con estas tareas. Asimismo, como la confiabilidad de un enlace depende de la confiabilidad de sus componentes (fibras, conectores, etc.), lo que por lo general tiene relación directa con el precio, es posible comparar los costos del mantenimiento correctivo con los costos de implementación usando elementos de diferentes calidades.

2. REDUNDANCIA Y CONFIABILIDAD DE LA TOPOLOGÍA DE ANILLO

El análisis de la confiabilidad de un anillo Ethernet se puede considerar desde dos puntos de vista que se complementan entre sí. Por una parte se tiene al anillo formado por N enlaces, cuya finalidad es dar conectividad entre sí a los N conmutadores. Por otra parte se considera al anillo completo (N enlaces y N conmutadores), cuya finalidad es proveer conectividad a las aplicaciones conectadas a cualquier par de conmutadores.

En el primer caso, un resultado de interés es el tiempo medio entre fallas del anillo ($MTBF_{RING}$). Se considera que una falla del anillo es aquella que produce una pérdida de conectividad y se presenta cuando hay simultáneamente dos o más enlaces interrumpidos. Debido a que esta condición puede acarrear pérdidas económicas, daños ambientales y riesgos humanos otro resultado de interés es la probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos a lo largo de un cierto período de tiempo (por ejemplo un año). Esto permite comparar el costo de las pérdidas debidas una caída del anillo con el costo de utilizar elementos de mayor confiabilidad.

Cabe mencionar que en base a los resultados del presente trabajo también se puede realizar una estimación de la frecuencia con que será necesario efectuar reparaciones, la que sirve de base para calcular los recursos necesarios para su ejecución.

2.1 Confiabilidad del anillo

Considerando un anillo formado por N enlaces, en el que cada enlace tiene una confiabilidad p_{LNK} y una probabilidad de falla q_{LNK} , por medio de la distribución binomial se puede calcular la probabilidad de que en algún momento haya n enlaces averiados.

$$P(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} q_{LNK}^n p_{LNK}^{(N-n)} \quad (1)$$

Si tanto p_{LNK} como q_{LNK} están calculadas sobre una base diaria, entonces $P(n)$ será la probabilidad de que en un mismo día se hayan producido fallas en n enlaces. Cabe tener en cuenta que a los fines de este trabajo se ha asumido que un enlace dañado será reparado en un plazo no mayor a 24 horas, y que la caída de un único enlace no afecta a la conectividad. Por lo tanto, la condición para que haya degradación en la conectividad es que dentro de algún período de 24 horas se produzcan fallas en dos o más enlaces. La probabilidad de que esto suceda, denominada q_{RING} , se calcula de la siguiente manera:

$$q_{RING} = P(>1) = 1 - [P(0) + P(1)] \quad (2)$$

De este modo se puede estimar la periodicidad con que se espera que ocurra este tipo de eventos, o sea el tiempo medio entre fallas del anillo:

$$MTBF_{RING} = \frac{1}{q_{RING}} \quad (3)$$

Si q_{RING} es la probabilidad de falla en un día, $MTBF_{RING}$ estará expresado en días.

El punto de partida para los cálculos precedentes es la confiabilidad de un enlace p_{LNK} , o bien su probabilidad de falla q_{LNK} . Por lo tanto, es fundamental poder contar con una buena estimación de estos valores. La confiabilidad de un enlace depende de la confiabilidad de sus componentes, de las condiciones de instalación, operación y mantenimiento, etc. No es igual para un enlace de fibra óptica que para un enlace inalámbrico, como así también habrá diferencias para distintas implementaciones de cada uno de ellos. Cada caso deberá ser analizado en forma particular. Sin embargo, a fin de tener un ejemplo que sirva como referencia, más adelante se considera un supuesto caso.

La confiabilidad p y la probabilidad de falla q de un cierto elemento se pueden obtener a partir del MTBF, según la siguiente fórmula:

$$p = e^{-\left(\frac{T}{MTBF}\right)} \quad (4)$$

Donde T es el período de análisis considerado, expresado en las mismas unidades que el MTBF.

Este cálculo es de utilidad práctica, debido a que el MTBF es un parámetro habitualmente informado por los fabricantes.

Luego se calcula la correspondiente probabilidad de falla:

$$q = 1 - p \quad (5)$$

En particular, para las condiciones planteadas para el presente análisis se considera al MTBF expresado en días y T igual a un día. Debido a que los valores de MTBF típicos son mucho mayores que 1, también se puede aplicar una fórmula aproximada más simple para obtener la probabilidad de falla:

$$q = \frac{1}{MTBF} \quad (6)$$

Luego, la confiabilidad es:

$$p = 1 - q \quad (7)$$

Cabe mencionar que los conceptos y fórmulas mencionadas son de aplicación habitual a problemas de confiabilidad (Dhillon, 2006; sección 3.4). También lo es lo referido a la confiabilidad de un conjunto de componentes dispuestos en serie o en paralelo.

2.1.1 Ejemplo: MTBF para un anillo de fibra óptica.

A fin de presentar algún ejemplo que sirva como referencia y permita orientar en la aplicación a distintos casos, se considera un anillo en el que cada segmento está compuesto por la fibra óptica (dos vías), una caja de empalme en cada extremo, patchcords de fibra y dos módulos de interfaz de tipo SFP.

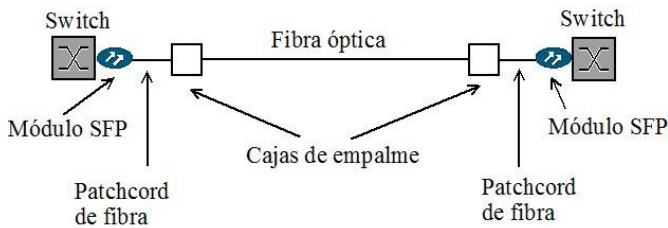


Figura 4. Modelo de enlace de fibra óptica considerado para el ejemplo

La confiabilidad de un enlace se calcula a partir de la confiabilidad de sus componentes, considerando su disposición en serie, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$p_{LNK} = p_{FO} \cdot p_{PC}^2 \cdot p_{SFP}^2 \quad (8)$$

Donde: p_{LNK} : confiabilidad del enlace
 p_{FO} : confiabilidad de la fibra óptica
 p_{PC} : confiabilidad de un patchcord
 p_{SFP} : confiabilidad de un módulo SFP

Los valores empleados en el ejemplo han sido obtenidos de distintas maneras. En el caso de los módulos SFP se ha considerado el MTBF indicado por Cisco (Cisco, 2008) para el modelo ONS-SC-GE-LX, que tiene un valor 9970080 hs. A partir del valor de $MTBF_{SFP}$ expresado en días, se obtiene la probabilidad de falla q_{SFP} y finalmente la confiabilidad p_{SFP} :

$$MTBF_{SFP} = 9970080 \text{ hs} = 415420 \text{ días} \quad (9)$$

$$q_{SFP} = \frac{1}{MTBF_{SFP}} = 2.4072 \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$p_{SFP} = 1 - q_{SFP} = 0.9999976 \quad (11)$$

Para determinar la confiabilidad de la fibra óptica se ha estimado un valor de MTBF de 25 años, en base a los 25 años de garantía que brinda AMP (AMP, 2008) sobre sus productos, incluyendo cables de fibra óptica y accesorios. Similar criterio se ha adoptado para los patchcords de fibra óptica. Por lo tanto:

$$MTBF_{FO} = 25 \text{ años} = 9125 \text{ días} \quad (12)$$

$$q_{FO} = \frac{1}{MTBF_{FO}} = 1.059 \times 10^{-4} \quad (13)$$

$$p_{FO} = 1 - q_{FO} = 0.999890 \quad (14)$$

$$p_{PC} = 0.999890 \quad (15)$$

Reemplazando en (8) con los valores obtenidos en (11), (14) y (15) se obtiene la confiabilidad de un enlace:

$$p_{LNK} = 0.999668 \quad (16)$$

Luego se calcula la probabilidad de falla de un enlace:

$$q_{LNK} = 1 - p_{LNK} \quad (17)$$

Reemplazando en (17) el valor obtenido en (12) se llega a la probabilidad de fallas en un día:

$$q_{LNK} = 3.32 \times 10^{-4} \quad (18)$$

También resulta de interés calcular el MTBF de un enlace ($MTBF_{LNK}$) por dos motivos: uno es poder compararlo con el MTBF del anillo, a fin de apreciar el beneficio de la redundancia provista por esta topología; otro es la conveniencia de utilizar este valor para especificar la calidad del enlace y poder comparar distintas calidades de ellos.

$$MTBF_{LNK} = \frac{1}{q_{LNK}} \quad (19)$$

Reemplazando en (19) el valor obtenido en (18) se obtiene:

$$MTBF_{LNK} = 2998 \text{ [días]} = 8.2 \text{ [años]} \quad (20)$$

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para anillos de distinta cantidad de nodos. Por una parte se observa que a pesar de que el MTBF de cada enlace es de 8.2 años, el MTBF del anillo es mucho mayor (cabe recordar que se considera una falla del anillo aquella que afecta a la conectividad, o sea que tienen que haber caído dos o más enlaces). Por otra parte se observa que el MTBF del anillo decrece considerablemente con el aumento de la cantidad de nodos (y enlaces).

Tabla 1. MTBF del anillo en función de N

N [nodos]	5	7	10	15	20	30
MTBF _{RING} [años]	2464	1174	548	235	130	57

Una importante conclusión práctica es que en lugar de implementar un único anillo con una gran cantidad de nodos, podría ser preferible implementar anillos más reducidos, conectados entre sí mediante un par de vínculos redundantes.

2.2 Probabilidad de caídas del anillo a lo largo de un año.

Teniendo en cuenta que el particionamiento del anillo puede acarrear importantes consecuencias, resulta conveniente hacer una estimación de la probabilidad de que en el transcurso de un cierto intervalo de tiempo, por ejemplo un año, se produzca un evento de ese tipo. Esto facilita la evaluación de sus consecuencias (por ej. económicas).

Tomando como referencia que el valor de $MTBF_{LNK}$ utilizado en el ejemplo anterior era igual a 8.2 años, en la Figura 5 se muestra la probabilidad de ocurrencia de fallas del anillo, con pérdida de conectividad, a lo largo de un año. Se han considerado redes de entre 5 y 30 nodos y $MTBF_{LNK}$ entre 4 y 10 años.

El valor que se representa en las curvas es q_{RING} expresado en fallas por año de manera porcentual. Por ejemplo: para un anillo de 30 nodos, con enlaces de $MTBF_{LNK}$ igual a 4 años, hay aproximadamente un 7.5% de probabilidad de que ocurra una falla con pérdida de conectividad. Haciendo una valoración (que puede ser de tipo económico) de las consecuencias de una falla de este tipo, se puede evaluar la conveniencia de invertir en enlaces de mayor confiabilidad y/o rediseñar la red.

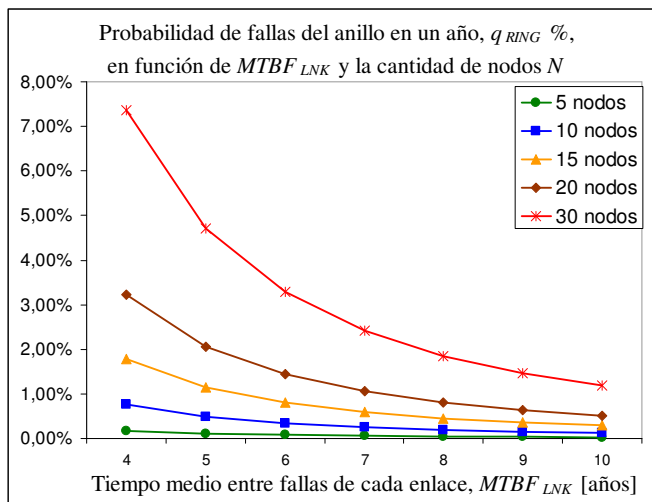


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia de caídas del anillo, con pérdida de conectividad, en un período de un año, calculada en función del MTBF de los enlaces y el tamaño de la red.

Se observa que con valores de $MTBF_{LNK}$ superiores a los 8.2 años utilizado en el ejemplo anterior, la probabilidad de fallas mejora lentamente. Sin embargo, con valores inferiores la confiabilidad de la red desciende rápidamente y se hace más notoria la influencia de la cantidad de nodos. Esto debe ser tenido en cuenta al momento de diseñar un anillo en el que los enlaces tengan una probabilidad de fallas importante (puede ser debido a sus características constructivas, a las condiciones ambientales en que operan u otros factores adversos).

Una posibilidad para aumentar la confiabilidad de los enlaces es hacerlos redundantes, es decir que cada segmento del anillo esté

formado por dos o más enlaces en paralelo. Esta técnica, denominada "Link Aggregation" está especificada por el estándar IEEE 802.3ad (IEEE, 2005). Hay diversos aspectos en la implementación de esta alternativa que merecen ser tratados en un trabajo futuro. Al momento cabe tenerla presente como una posibilidad para elevar la confiabilidad de los vínculos.

3. CONFIABILIDAD DE LA COMUNICACIÓN A TRAVÉS DE LA RED

En la sección anterior se ha analizado el beneficio que brinda la topología de anillo para asegurar la conectividad entre los conmutadores de la red, debido a la redundancia de un enlace. Como el objetivo de la red es brindar conectividad a las aplicaciones, que en el caso específico de una red industrial son los sistemas de control y los dispositivos de campo, en esta sección se analiza la confiabilidad de la comunicación entre dispositivos conectados a diferentes conmutadores. En la Figura 6 se presenta el diagrama de red que sirve como modelo para este análisis. Como el interés está en analizar la confiabilidad para la comunicación entre dispositivos ubicados en distintos nodos, se ha considerado un solo dispositivo por conmutador.

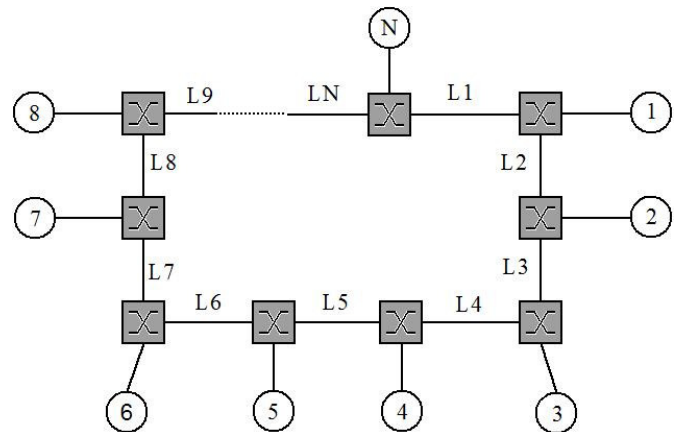


Figura 6. Anillo Ethernet con N conmutadores, N enlaces y un dispositivo conectado a cada conmutador. Modelo utilizado para analizar la confiabilidad de la comunicación entre dispositivos.

Se han planteado los siguientes objetivos:

- Determinar si, dados dos dispositivos que se comunican a través de la red, la ubicación relativa que tienen dentro del anillo afecta a la confiabilidad de la comunicación entre ellos, y en que medida.
- A partir de lo anterior, determinar cual es la condición más desfavorable para la ubicación relativa entre dos dispositivos.
- Determinar la influencia de conmutadores y enlaces en la confiabilidad de la comunicación de extremo a extremo, para anillos con diferentes cantidades de nodos.

Se puede observar que, dados dos dispositivos conectados a distintos conmutadores, hay dos posibles caminos entre ellos. Un camino sigue el sentido de la agujas del reloj (CK) y el otro el sentido antihorario (CCK). El siguiente análisis considera la comunicación entre los dispositivos m y N .

En primer lugar se analiza la comunicación entre los conmutadores m y N ; posteriormente se trata la comunicación

entre los dispositivos m y N .

3.1 Confiabilidad de la comunicación entre dos conmutadores

Se advierte que para ir desde el conmutador m hasta el conmutador N , por el camino CCK hay que atravesar m enlaces y $m-1$ conmutadores mientras que por el camino CK se deben atravesar $N-m$ enlaces y $N-m-1$ conmutadores. La confiabilidad de cada uno de estos caminos se calcula de la siguiente manera:

$$P_{CCKm} = P_{LNK}^m \cdot P_{SW}^{m-1} \quad (21)$$

$$P_{CKm} = P_{LNK}^{N-m} \cdot P_{SW}^{N-m-1} \quad (22)$$

Donde p_{sw} es la confiabilidad de un conmutador calculada a partir de $MTBF_{SW}$, el tiempo medio entre fallas expresado en cantidad de días:

$$q_{SW} = 1/MTBF_{SW} \quad (23)$$

$$p_{SW} = 1 - q_{SW} \quad (24)$$

Al haber dos caminos posibles entre m y N , la confiabilidad de la comunicación está dada por un modelo en paralelo: para no tener comunicación deben fallar ambos caminos a la vez. La probabilidad de falla de cada uno de los dos caminos es:

$$q_{CCKm} = 1 - P_{CCKm} \quad (25)$$

$$q_{CKm} = 1 - P_{CKm} \quad (26)$$

Por lo tanto, la probabilidad de falla del camino redundante entre los conmutadores m y N es:

$$q_{Rm} = q_{CCKm} \cdot q_{CKm} \quad (27)$$

Luego, su confiabilidad es:

$$p_{Rm} = 1 - q_{Rm} \quad (28)$$

Un valor que resulta más conveniente para expresar estos resultados y poder efectuar comparaciones entre distintas implementaciones es el tiempo medio entre fallas. La notación para esta magnitud es $MTBF_{Rm}$, y su significado es tiempo medio entre fallas de comunicación entre los conmutadores m y N . Se calcula a partir de (27) de la siguiente forma:

$$MTBF_{Rm} = 1/q_{Rm} \quad (29)$$

Cabe recordar que una de las suposiciones sobre las que se basan los resultados presentados es que en caso de producirse la falla de un enlace, éste quedará restablecido en un plazo máximo de 24 horas. Se ha adoptado este criterio por ser de aplicación habitual en la industria. Sin embargo se podría adoptar otro tiempo de respuesta, por ejemplo 48 horas o una semana, en función de las condiciones reales de operación y mantenimiento. En tal caso, será necesario rehacer los cálculos en base al tiempo de respuesta elegido.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se presentan los valores de $MTBF_{Rm}$ obtenidos para un anillo de $N=10$ nodos, considerando dos calidades de enlaces y conmutadores (Tabla 2). En un caso $MTBF_{LNK}=8$ años y $MTBF_{SW}=52$ años. En el otro caso,

$MTBF_{LNK}=4$ años y $MTBF_{SW}=8$ años.

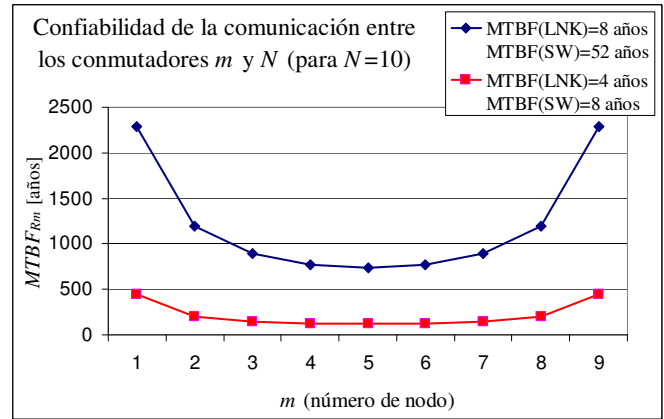


Figura 7. Tiempo medio entre fallas de comunicación entre los conmutadores m y N , para distintas ubicaciones relativas dentro del anillo. Se considera un anillo de 10 nodos y dos calidades de enlaces y conmutadores.

Se observa que, en ambos casos, la mejor condición se da cuando los conmutadores son vecinos y la peor condición se da cuando los conmutadores están diametralmente opuestos. Por lo tanto, el peor valor de la confiabilidad de la comunicación entre dos conmutadores, considerando la redundancia de caminos, es:

$$p_R = 1 - (1 - p_{LNK}^{N/2} \cdot p_{SW}^{(N-2)/2})^2 \quad \text{- Para } N \text{ par -} \quad (30)$$

$$p_R = 1 - (1 - p_{LNK}^{(N+1)/2} \cdot p_{SW}^{N/2}) \cdot (1 - p_{LNK}^{(N-1)/2} \cdot p_{SW}^{(N-3)/2}) \quad \text{- Para } N \text{ impar -} \quad (31)$$

A partir de estos resultados, el siguiente paso consiste en analizar la comunicación entre dos dispositivos conectados a distintos conmutadores.

3.2 Comunicación entre dos dispositivos a través del anillo

Debido a que en el punto anterior se ha analizado la comunicación entre dos conmutadores a través del anillo, teniendo en cuenta la redundancia provista por él, se puede considerar que la comunicación entre dos dispositivos corresponde al modelo presentado en la Figura 8.

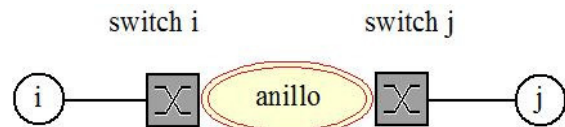


Figura 8. Modelo de la comunicación entre dos dispositivos a través del anillo. Los conmutadores de ambos extremos no están incluidos en el anillo.

Nuevamente, a fin de facilitar el desarrollo, se considera la comunicación entre m y N . Para calcular la confiabilidad de la comunicación entre los dispositivos m y N se considera la confiabilidad del anillo dada en (28) y se incluyen ambos

conmutadores, según la siguiente expresión:

$$P_{Dm} = P_{SW}^2 \cdot P_{Rm} \quad (32)$$

La probabilidad de falla de comunicación entre dispositivos es:

$$q_{Dm} = 1 - P_{Dm} \quad (33)$$

Y a fin de tener un indicador más conveniente para expresar la confiabilidad de la comunicación entre dispositivos, se calcula el correspondiente tiempo medio entre fallas:

$$MTBF_{Dm} = 1/q_{Dm} \quad (34)$$

En la Figura 9 se presentan los resultados correspondientes a la confiabilidad de la comunicación entre dos dispositivos m y N , para un anillo de $N=10$ nodos. Se han considerado valores de $MTBF_{LNK}$ y $MTBF_{SW}$ iguales a los utilizados para el gráfico de la Figura 7. La magnitud representada es $MTBF_{Dm}$ expresada en cantidad de años.

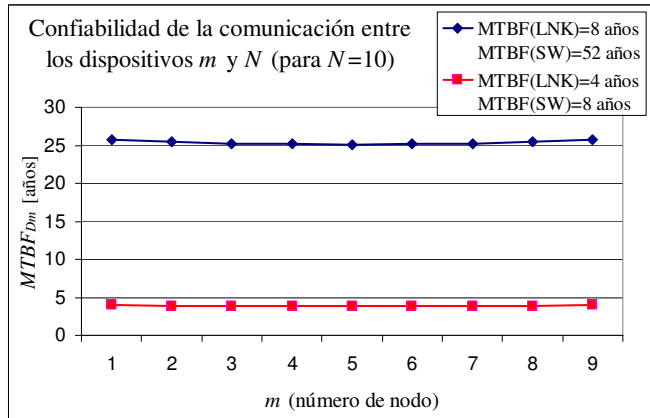


Figura 9. Tiempo medio entre fallas de comunicación entre los dispositivos m y N , para distintas posiciones relativas dentro del anillo y considerando dos calidades de enlaces y conmutadores.

De la comparación entre las mencionadas gráficas de $MTBF_{Rm}$ y $MTBF_{Dm}$ es posible efectuar las siguientes observaciones:

- Debido a la configuración en serie de los dos conmutadores extremos con el anillo, la confiabilidad final está determinada fundamentalmente por los dos conmutadores.
- Por la misma razón, no se observa que la confiabilidad tenga una dependencia significativa con la posición relativa de los dos dispositivos dentro del anillo. De tal modo, se podría adoptar en forma general que la confiabilidad del anillo es la del peor caso, que se calcula según (30) ó (31).

En base a esta última observación, la confiabilidad mínima de la comunicación entre dos dispositivos a través del anillo es:

$$P_D = P_{SW}^2 \cdot P_R \quad (35)$$

Luego, las correspondientes probabilidad de falla y tiempo medio entre fallas serán:

$$q_D = 1 - P_D \quad (32)$$

$$MTBF_D = 1/q_D \quad (33)$$

Esta última magnitud resulta de utilidad para comparar la confiabilidad esperada de distintas implementaciones, en función de los valores de MTBF de enlaces y conmutadores y de la cantidad de nodos que componen el anillo. En tal sentido, a continuación se realiza un análisis comparativo en base a valores de $MTBF_{SW}$ obtenidos de las hojas de datos de algunos fabricantes.

3.2.1 Comparación entre distintas calidades de implementación

A fin de efectuar una comparación desde el punto de vista de la confiabilidad de la comunicación entre un par de dispositivos, se han considerado tres calidades de enlaces y tres calidades de conmutadores.

En cuanto a los enlaces, tomando como referencia los 8.2 años utilizados en el ejemplo del punto 2.1.1 –ecuación (20)–, se ha considerado dos alternativas, una mejor (12 años) y otra peor (4 años).

Por otra parte, para el MTBF de los conmutadores se han considerado tres valores bastante diferenciados: 8, 23 y 56 años, en base a las especificaciones de algunos fabricantes reconocidos en el rubro Ethernet Industrial (Hirschmann, 2008; Siemens, 2008; Moxa, 2008). En la Tabla 2 se presenta una serie de valores orientativos del MTBF para distintas clases de conmutadores. En base a ellos se han adoptado los tres valores antes mencionados, por ser representativos de tres calidades de equipamiento.

Si bien se puede ver que hay algún modelo con MTBF de 105.7 años, no se lo ha considerado debido a que tiene prestaciones más limitadas que los demás (sin gestión ni puertos de 1 Gb). No obstante, vale tener presente que es posible aumentar la confiabilidad a cambio de sacrificar prestaciones.

Tabla 2. Valores orientativos del MTBF para una cierta gama de switches Ethernet Industrial.

Tipo de conmutador	Puertos 10/100 Mb	Puertos 1 Gb	MTBF mínimo [años]	MTBF máximo [años]
Con gestión, para campo o área de trabajo	4 a 12	2 a 4	18	52.61
Sin gestión, para campo o área de trabajo	5 a 8	-	29.11	105.7
Con gestión, para sala de control	24 o 48	2 o 4	8.1	28.6

En la Figura 10 se presentan los resultados obtenidos para distintas combinaciones de enlaces y conmutadores y también en función de la cantidad de nodos que componen el anillo.

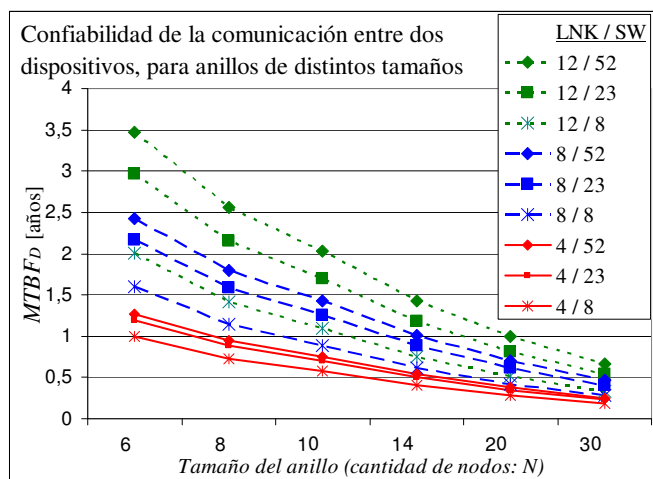


Figura 10. Tiempo medio entre fallas de comunicación entre dos dispositivos, en función de la cantidad de nodos del anillo, para distintos valores del MTBF de enlaces y conmutadores.

De allí se pueden extraer algunas conclusiones de utilidad, que permiten orientar las tareas de diseño de la red y selección de componentes:

- La confiabilidad del anillo, p_R , depende básicamente de la confiabilidad de los enlaces. Si los enlaces son de baja confiabilidad no se logra un beneficio apreciable al usar conmutadores de elevado MTBF (ver curvas en rojo).
- A mayor confiabilidad de los enlaces, $MTBF_D$ depende en mayor medida de la confiabilidad de los conmutadores. La combinación de enlaces de alta confiabilidad con conmutadores de baja confiabilidad no da buenos resultados. Se puede observar que $MTBF_D$ es superior para enlaces con $MTBF_{LNK}=8$ años y $MTBF_{SW}=52$ años, que para $MTBF_{LNK}=12$ años y $MTBF_{SW}=8$ años.
- La degradación de $MTBF_D$ con el aumento de la cantidad de nodos en el anillo es pronunciada. Se reduce a aproximadamente la mitad al duplicar la cantidad de nodos. Cabe evaluar la conveniencia de dividir la red en pequeños anillos de 6 a 7 nodos, conectados entre sí mediante vínculos redundantes.
- No resulta conveniente mezclar enlaces y conmutadores de diferente calidad. Enlaces de elevada confiabilidad con conmutadores de baja confiabilidad arrojan resultados mediocres debido a la mayor influencia de los conmutadores. Asimismo en el caso contrario, con enlaces de baja confiabilidad no hay un beneficio relevante si los conmutadores son de elevada confiabilidad. Dado que el resultado final está condicionado por la baja calidad de los enlaces, utilizar conmutadores de elevado MTBF (y precio) significa en gran medida un derroche.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la primera parte del análisis muestran que la cantidad de enlaces y su confiabilidad tienen una marcada influencia en la confiabilidad de la comunicación entre conmutadores. Estos dos factores también tienen una notable influencia en la demanda de tareas de mantenimiento correctivo. Es importante recordar que la confiabilidad resultante también depende del tiempo de respuesta para la solución de una

falla. Si hay gran cantidad de enlaces y/o éstos tienen baja confiabilidad habrá una mayor exigencia en lo que hace a reparaciones y stock de repuestos. En el presente trabajo se ha considerado que al producirse una falla, el tiempo de respuesta para repararla será a lo sumo de 24 horas. En un trabajo futuro sería de interés estudiar la variación de la confiabilidad en función del tiempo de respuesta para la solución de fallas. Esto puede resultar de utilidad en redes que presentan grandes dificultades para el acceso a los sitios, ya sea por las distancias como así también por las condiciones del lugar.

En la segunda parte del trabajo se han incluido a los conmutadores, con la finalidad de evaluar la confiabilidad de la comunicación de extremo a extremo, entre dispositivos conectados a través de la red. En este caso se puede observar que la confiabilidad resultante depende principalmente de los conmutadores, y que la calidad de los enlaces contribuye a degradar en mayor o menor medida la confiabilidad aportada por los conmutadores. No se pueden lograr buenos resultados con conmutadores de baja calidad, por más que los enlaces sean muy confiables. Tampoco se obtienen beneficios cuando los enlaces son poco confiables y se utilizan conmutadores de elevada confiabilidad.

Un caso a ser considerado en un futuro trabajo es la implementación del anillo empleando vínculos redundantes, mediante la técnica conocida como "Link Aggregation". Por otra parte, teniendo en cuenta la influencia que tiene la cantidad de nodos del anillo, otro caso a analizar es la división de la red en varios anillos de menor tamaño, conectados entre sí mediante vínculos redundantes.

REFERENCIAS

- AMP (2008). <http://www.ampnetconnect.com>.
- Cisco (2008). *Cisco ONS Family Optical Pluggable Modules*. http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/optical/ps5724/ps2006/brochure_c02-452560.html
- Dillon B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers*. Taylor & Francis Group. Boca Ratón, Florida. 2006.
- Fritsch A. (2007). Industrial Ethernet goes process automation...and what about explosion protection? In *Proceedings of the 4th European Conference on Electrical and Instrumentation in the Petroleum and Chemical Industry, 2007, PCIC Europe 2007*, p. 1-7.
- Hirschmann (2008). Sitio web de Redes Industriales de Hirschmann. <http://www.hirschmann-ac.de/Espanol/Redes-Industriales/index.phtml>
- IEEE (2004). *IEEE Std. 802.1D™. IEEE Standard for local and metropolitan area networks*. Media Access Control (MAC) Bridges. IEEE Computer Society. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1D-2004.pdf>
- IEEE (2005). *IEEE Std. 802.3™. IEEE Standard for local and metropolitan area networks*. Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications. Section three, clause 43. http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3-2005_section3.pdf
- Jasperneite J. y Neumann P. (2001). Switched Ethernet for factory automation. In *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation (ETFA'01)*, p. 205-212.
- Jasperneite J., Neumann P., Theis M y Watson K. (2002). Deterministic real-time communication with switched

- Ethernet. In Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS'02), p. 28-30.
- Lee S., Lee K.C. y Kim H.H. (2004). Maximum Communication Delay of a Real-time Industrial Switched Ethernet with Multiple Switching Hubs. In the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2-6 Nov. 2004, Busan, Korea, p. 2327-2332.
- Lingyan H., Jie P. y Yong X. (2008). Experimental Research about the Impact of IEEE 802.1P on Real-time Behavior of Switched Industrial Ethernet. In Proceedings of the 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 3-4 Aug. 2008, p. 403-406.
- Moxa (2008). Sitio web de Ethernet Industrial de Moxa. http://www.moxa.com/product/Industrial_ethernet.htm
- Prytz G. (2006). Redundancy in Industrial Ethernet Networks. In: Proceedings of 2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 27 Jun. 2006, p. 380-385.
- Prytz G. (2007). Network Recovery Time Measurements of RSTP in an Ethernet Ring Topology. In: Proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation 2007, ETFA. 25-27 Sep. 2007, Patras, Grecia, p. 1247-1253.
- Rüpping S. Vonname E. y Jasperneite J. (1999). Analysis of Switched Ethernet Networks with different Topologies used in Automation Systems. In: Field Bus Technology. p. 351-358. Springer-Verlag.
- Ryoo J., Long H., Yang Y., Holness M., Ahmad Z. y Rhee K. (2008). Ethernet Ring Protection for Carrier Ethernet Networks. *IEEE Communications Magazine*, Sep. 2008, p. 136-143.
- Siemens (2008). Sitio web de Ethernet Industrial de Siemens. http://www.automation.siemens.com/net/html_76/produkte/040_produkte.htm
- Vonname E., Rüping S. y Rückert U. (2000). Measurements in Switched Ethernet Networks Used for Automation Systems. In: Proceedings of IEEE International Workshop on Factory Communications Systems, p. 231-238.
- Wojdak W. (2003). Rapid Spanning Tree Protocol. *Compact PCI and Advanced TCA Systems*. Open Systems Publishing. Marzo 2003. <http://www.compactpci-systems.com/PDFs/PerfTech.Mar03.pdf>
- Yoon G., Kwon D. H., Kwon S. C., Park Y. O. y Lee Y. J (2006). Ring Topology-based Redundancy Ethernet for Industrial Network. In: Proceedings of IEEE SICE-ICASE International Joint Conference 2006. 18-21 Oct. 2006, Bexco, Busan, Korea, p. 1404-1407.
- Zhang Q. y Zhang W. (2005). Priority Scheduling in Switched Industrial Ethernet. In: Proceedings of 2005 American Control Conference, 8-10 Jun. 2005, Portland, Oregon, USA, p. 3366-3370.
- Zhao T., Li Z., Wang Z. y Xu K. (2006). High Safety Gas-supplying Control System Development Based on Ring-redundant Industrial Ethernet. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 16-18 Oct. 2006, Jinan, China, p. 78-81.